

PM BLDC 모터의 PLL 알고리즘을 사용한 정밀속도제어 및 센서리스 기법

(Precise Speed Control and Sensorless Technique of of PM BLDC Motor Using the PLL Algorithm)

이승준* · 윤용호* · 김영란* · 원충연* · 최유영**

(Seung-Jun Lee · Yong-Ho Yoon · Young-Ran Kim · Chung-Yuen Won · You-Young Choi)
(성균관대학교* · 키네모손**)

Abstract

Brushless DC Motor(PM BLDCM) is widely used in industrial applications due to its high efficiency and power density. In order to increase reliability and reduce system cost, this paper studies particularly applicable method for sensorless PM BLDCM drive system. The resulting third harmonic signal keeps a constant phase relationship with the rotor flux for any motor speed and load condition, and is practically free of noise that can be introduced by the inverter switching, making this a robust sensing method. As a result, the method described here is not sensitive to filtering delays, allowing the motor to achieve a good performance over a wide speed range. In addition, a simple starting method and a speed estimation approach are also proposed.

1. 서론

최근에는 전동기의 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 또한 환경 및 에너지 문제에 관심이 높아지면서 전기기기의 효율 및 성능이 중요한 문제로 대두되게 되었다.

PM BLDC 전동기는 영구자석 재료의 고 에너지 밀도화와 더불어 산업 기기의 전반에 걸쳐 널리 이용되고 있으며, 동일한 체적의 영구자석으로 출력을 증가하기 위한 자기회로 설계 등이 활발히 이루어지고 있다.^[1]

PM BLDC 전동기는 회전자 위치에 따라 전동기의 상전류를 전환해주어야 하므로 홀센서나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이다.

본 논문에서는 여러 가지 센서리스 구동방식 중에 단자전압의 3고조파 성분을 이용하는 방법을 제안하였다.^[2] 이 방법은 필터에 의한 지연에 민감하지 않고, 넓은 속도 범위에서 좋은 수행능력을 가지는 장점이 있다. 또한 3고조파 성분^[3]을 이용하여 홀센서 신호를 발생하는 알고리즘과 초기구동 알고리즘을 유도하였다. PLL(Phase Locked Loop)을 적용함으로써 저속도에서도 높은 분해능을 얻을 수 있어, 기존에 속도 제어를 위해 필요했던 고가의 속도 센서인 레졸버와 엔코더 역할을 대신하여 전체적인 구동 회로의 가격을 낮출 수 있었다.^{[4][5]}

2. 본론

1. PM BLDC 전동기의 센서리스 운전원리

본 논문에서는 고정자의 제 3고조파 전압 성분을

을 이용하여 PM BLDC 전동기의 회전자 위치를 간접 검출하는 방법을 제안하였다. 제 3고조파 전압 성분을 검출해 내기 위해서는 그림 1에 보인 바와 같이 3상의 단자 전압을 동일한 값을 가지는 저항 R을 이용하여 Y-결선으로 연결한다. 이때 모터 내부의 중성점을 m, 저항 R을 Y-결선으로 연결하여 만들어진 중성점을 n이라고 하면, 두 개의 중성점 간의 전압 V_{nm} 이 제 3고조파 전압 성분이 된다.

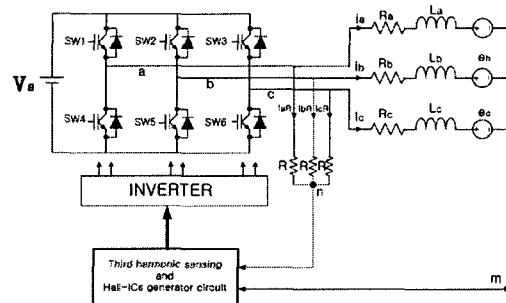


그림 1 제 3 고조파 검출 회로
Fig. 1 Third harmonic sensing circuit.

단자 n의 전압 v_n 의 분석을 위해서는 키르히호프의 전압방정식(KVL)을 적용하면

$$\begin{cases} v_{am} + v_{mn} + v_{na} = 0 \\ v_{bm} + v_{mn} + v_{nb} = 0 \\ v_{cm} + v_{mn} + v_{nc} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

또한, 그림1로부터 v_{an} , v_{bn} , v_{cn} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} v_{an} = Ri_{aR} \\ v_{bn} = Ri_{bR} \\ v_{cn} = Ri_{cR} \end{cases} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 정리하면 다음과 같다.

$$v_{mn} = -\frac{1}{3}(v_{am} + v_{bm} + v_{cm}) \quad (3)$$

제 3 고조파 성분은 회전자의 위치 정보를 가지고 있다. 따라서 이 전압을 적분하여 90° 지연된 파형을 얻어내고, 이를 영 전압 검출 회로(Zero crossing detection circuit)를 거치면 정류 신호(Commutation signal)를 만들어 낼 수 있다.

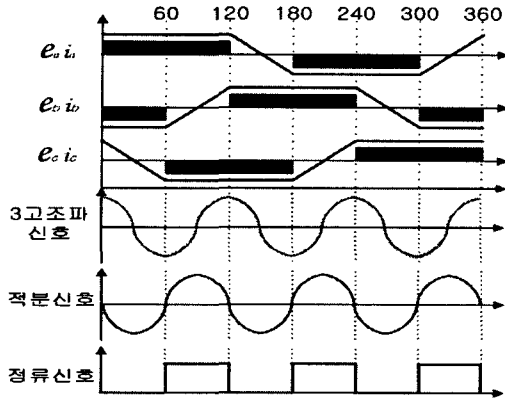


그림 2 제 3 고조파를 이용한 정류 신호의 생성
Fig. 2 Commutation signal using third harmonic signals.

그림 2와 같은 방법으로 만들어낸 전환 신호를 이용하여 PM BLDC 전동기를 센서리스로 운전하는 방식은 상지연 필터가 필요 없다. 하드웨어적으로 전류의 전환 시점이 결정되고 역기전력 파형과 상전류가 비교적 정확한 동기를 유지할 수 있으므로 넓은 속도 범위에서 안정적인 센서리스 운전이 가능하다.

2. 제안한 Hall-ICs 신호발생 알고리즘

그림 3은 제 3 고조파 성분을 입력으로 하는 각 상의 Hall-ICs신호를 생성하는 EPLD 내부 블록을 나타내고 있다.

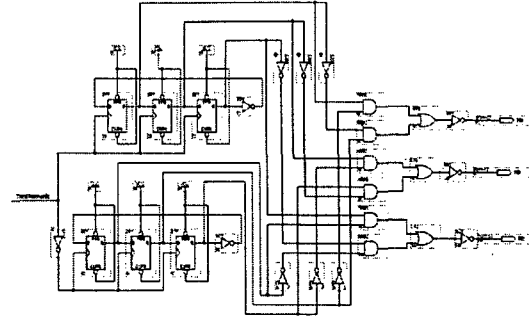


그림 3 존슨카운터를 이용한 Hall-ICs 생성블록도
Fig. 3 Hall-ICs creation block using Johnson counter

그림4는 각 상의 Hall-ICs 신호를 추정하는 세부내용을 나타낸 것이다. Hall-ICs 신호는 존슨카운터(Johnson counter)를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-ICs의 값을 논리도로 조합하여 생성하였다. 일반적으로 PM BLDC 전동기의 경우 각 상의 위치 판별을 위해 각 상에 대해 Hall-ICs를 갖는 것이 기본이다. 하지만 본 논문에서는 그림 2와 같은 방법으로 얻어낸 정류신호를 입력으로 사용하여 3상의 Hall-ICs의 신호를 만들어 낸다. 추정된 Hall-ICs 신호는 전동기에 부착된 Hall-ICs 신호와 동일한 주기와 주파수를 가지고 발생한다.

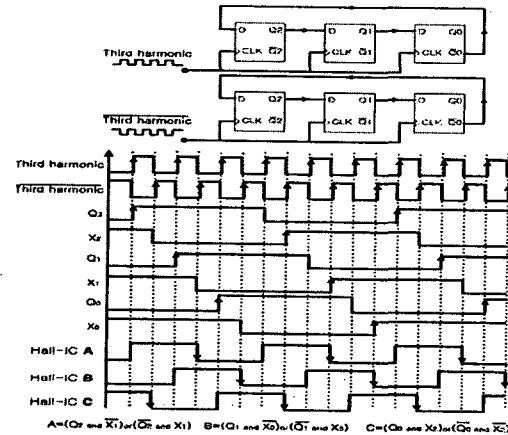


그림 4 EPLD를 이용한 홀센서 신호발생 알고리즘
Fig. 4 Hall-ICs signal creation Algorithm using the EPLD.

3. 제안한 PM BLDC 전동기의 초기구동 방법

그림 5는 PM BLDC 전동기의 초기구동 알고리즘을 나타내고 있다. 초기구동은 3개의 동작모드로 구성되어 있다.

- 1) mode 1. align mode
 - 2) mode 2. ramp mode
 - 3) mode 3. closed-loop speed control mode
- mode 1은 초기 정렬 모드로 두상을 강제로 여

자시커 회전자에 어떤 위치에 있던 지정한 상으로 정렬하도록 하는 강제정렬의 모드이다.

mode 2는 동기가속모드로 강제정렬이 정상적으로 수행된 경우 회전자는 지정된 상에 정렬되어있으며 제어기는 다음 상을 순차적으로 여자시켜 줌으로써 운전을 시작하게 된다. 제안한 센서리스 운전에서 일정 속도에 도달하기 전까지는 간접 검출한 신호로 센서리스 운전을 하는 것이 불가능하기 때문에 신뢰성 있는 회전자 위치정보신호를 검출할 수 있는 영역까지 가속을 하는 모드이다.

mode 3은 검출된 3고조파에 의해 구해진 전환신호에 의해 생성된 Hall-ICs신호를 이용하여 PM BLDC 전동기를 구동하는 모드이다.

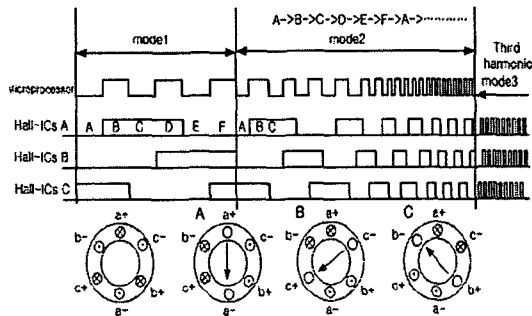


그림 5 PM BLDC 전동기의 초기 구동 알고리즘
Fig. 5 Proposed starting procedure of PM BLDCM.

4. 제안한 PM BLDC 전동기의 전체 구동원리

그림 6은 PM BLDC 전동기의 전체 제어 블록도를 나타내고 있다. EPLD로부터 검출된 홀센서 신호로 회전자 위치 정보와 속도 정보를 추정하여 속도 제어기의 실제 속도(ω_{real}) 입력이 되고, 속도 제어기는 기준 전류(I_{ref})를 실제 전류(I_{real})와 비교하여 전류제어를 수행하게 된다. 속도 제어기는 PI 제어, 전류 제어기는 히스테리시스 전류제어방식으로 설계하였다.

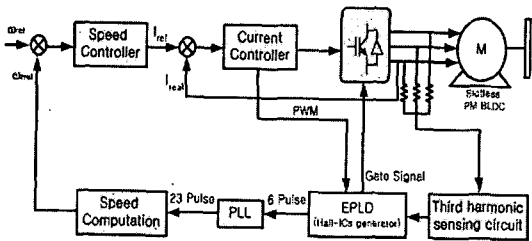


그림 6 PM BLDC 전동기의 폐루프 제어 블록도
fig. 6 Feedback control block of PM BLDC Motor.

5. 정밀속도 제어를 위한 PLL 알고리즘

일반적으로 속도를 측정하기 위해서는 엔코더나

레졸버와 같은 속도 센서를 사용해야만 한다. 그러나 본 논문에서는 3고조파 성분을 이용하여 홀센서 신호를 발생하는 알고리즘을 사용하므로 분해능(resolution)이 낮아지게 된다.

그러므로 보다 정밀한 속도제어를 하기위해 회전자속도에 비례하는 펄스를 만드는 PLL(Phase Locked Loop)을 사용하였다.

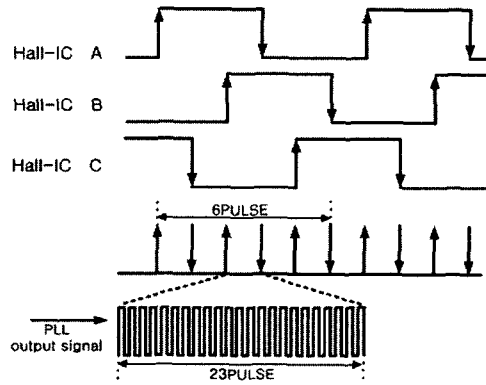


그림 7 생성된 Hall-ICs 신호와 PLL 신호
Fig. 7 Creative Hall-ICs Signals and PLL output signal during one period.

그림 7은 Hall-IC신호를 이용하여 1회전당 6Pulse의 신호와 그에 따른 PLL에서 발생하는 펄스의 구성도를 보여주고 있다. Hall-IC의 신호는 120도의 위상차를 가지고 발생하며, 각상은 서로 60도씩 교차하게 되어있다. 이와 같은 방법으로 EPLD내에서 60도 마다 펄스가 발생 되도록 회로를 구현하여 PLL회로에 적용 1회전당 138개($23 \times 6 = 138$)의 펄스를 얻어 엔코더에서 발생하는 A상과 B상의 펄스와 같은 역할을 할 수 있도록 구성하였다.

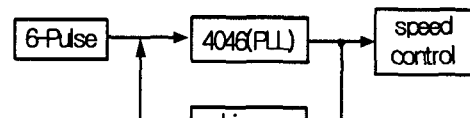


그림 8 PLL을 이용한 제안된 회전자 위치 신호
Fig. 8 The block diagram of the proposed rotor position signal synthesizer.

그림 8은 본 논문에서 정밀한 속도제어를 하기 위해 PLL을 이용한 제안된 회전자 위치 신호 발생도를 보여주고 있다.

회전자 위치 신호는 6펄스를 발생할 수 있도록 하는 EPLD부분과 회전자 주파수의 변화에 비례하면서 출력 신호의 주파수를 증가시키는 PLL부분으로 구성되어 있다. 따라서 기존의 Hall-ICs를 사용했을 경우의 낮은 분해능의 문제점등을 해결하여 정밀속도를 요구하는 분야에 사용된다. 이와 함께 기존의 엔코더나 레졸버와 같은 속도센서를 대체하여 경제적인 부분 등을 해결 할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안된 알고리즘을 PSIM 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션과정을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

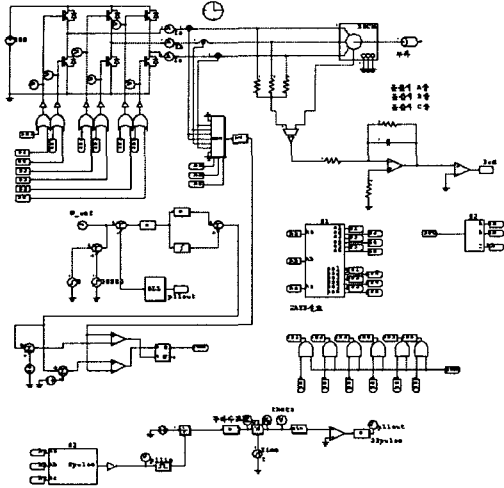


그림 9 PM BLDC Motor의 전체 시뮬레이션 블록도
Fig. 9 The overall simulation block diagram for PM BLDC Motor.

그림 9는 PM BLDC 전동기 구동 시스템의 전체 시뮬레이션 블록도를 나타내고 있다. 구성은 PM BLDC 전동기, 인버터, 게이트 드라이버, 스위칭 로직, PLL, 6펄스 로직, 홀센서 생성 로직, 속도 및 전류 제어 블록으로 되어있다. 6Pulse 로직 부분은 PSIM내의 DLL을 이용하여 C로 작성하였다.

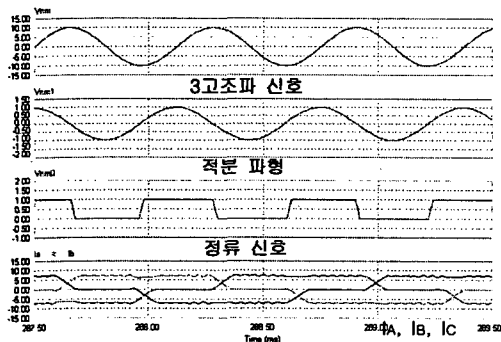


그림 10 3고조파를 이용한 정류 신호
Fig. 10 Commutation signal using third harmonic signal.

그림 10은 고정자의 제 3 고조파 전압 성분과 이 전압의 적분파형, 그리고 이를 영점(0) 검출회로를 거쳐 생성된 정류신호(Commutation signal)를 나타내고 있다.

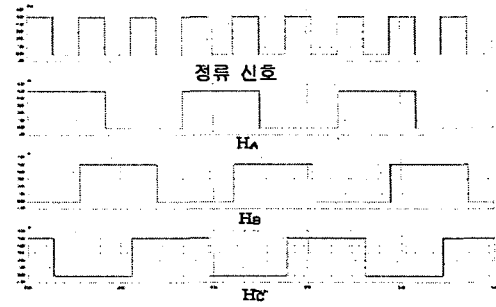


그림 11 정류 신호를 이용한 각 상의 Hall-ICs 신호 생성
Fig. 11 Hall-ICs signal Creation using Commutation signal.

그림 11은 3고조파 신호를 이용하여 3상의 Hall-ICs 신호를 추정하는 알고리즘이다. Hall-ICs 신호는 존슨카운터(Johnson counter)를 두개를 병렬로 연결하여 각 상에 맞는 Hall-ICs의 값을 논리도로 조합하여 생성된 신호이다.

그림 12는 10000rpm 일 때의 6펄스 신호를 PLL 회로에 입력하여 출력된 신호를 나타낸다.

그림 13은 10000rpm으로 회전 시 각 상의 전류를 나타내고 있으며, 속도는 PLL 펄스 중 임의의 펄스 두개 사이의 시간(t)을 검출함으로써 알 수 있다.

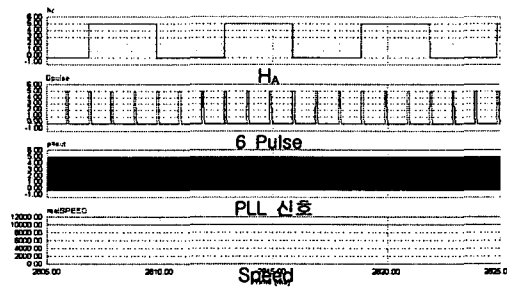


그림 12 6펄스 신호와 PLL 신호(10000rpm)
Fig. 12 6Pulse Signals and PLL Singals(10000rpm).

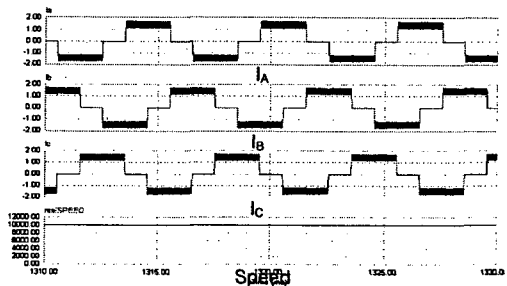


그림 13 각 상전류 파형(10000rpm)
Fig. 13 Each Phase Current wave(10000rpm).

4. 실험 결과

본 논문에서는 80C196KC 제어보드를 사용하였

으며 인버터는 고 신뢰성을 갖는 IPM을 사용하여 제작하였다.

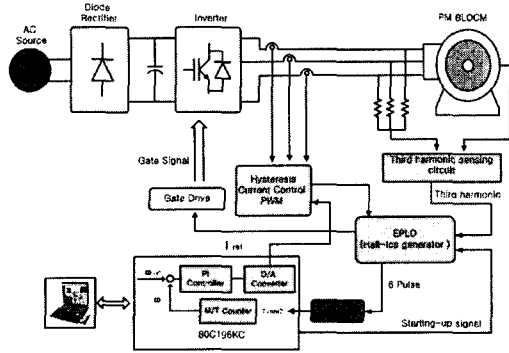


그림 14 PM BLDC 전동기의 구동 시스템
Fig. 14 PM BLDC Motor driving system.

그림 14는 3고조파를 검출하여 EPLD 로직을 통해 홀센서와 동일한 신호를 만들어 PM BLDC 전동기의 제어 시스템의 전체 블록도를 나타내고 있다.

표 1 PM BLDC 전동기 구동 시스템 사양
Table. 1 Specification of PM BLDC Motor

고정자 저항	0.88
입력 전압	90Vdc ~ 340Vdc
정격 입력 전력	1KW
정격 출력 전력	0.9KW
정격 속도	33000rpm
정격 전류	3.6Amps at 280Vdc
극수	2

실험에 사용된 Slotless PM BLDC 전동기는 2극, Y결선으로 사양은 표 1과 같다.

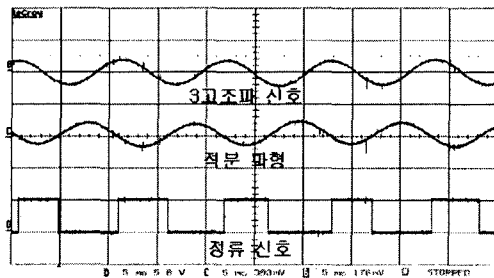


그림 15 3고조파를 이용한 정류 신호
Fig. 15 Commutation signal using third harmonic signal.

그림 15는 고정자의 제 3 고조파 전압 성분과 이 전압의 적분파형, 그리고 이를 영점(0) 검출회로를 거쳐 생성된 정류신호(Commutation signal)를 나타내고 있다.

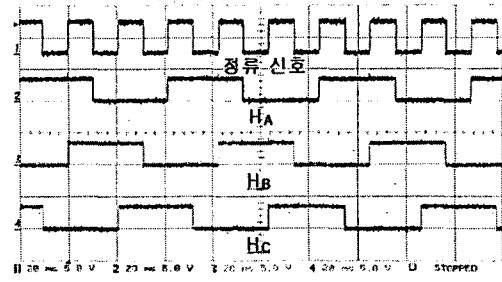


그림 16 생성된 정류신호를 이용한 각 상의 홀센서 신호생성
Fig. 16 Each phase Hall-ICs creation signal using creative commutation signal.

그림 16은 3고조파 신호를 이용하여 3상의 Hall-ICs 신호를 추정한 실험결과이다.

그림 17은 본 논문에서 PLL을 이용하여 제안된 회전자 위치신호의 파형을 보여주고 있다. 30000rpm일 경우 회전자가 1회전하였을 때 EPLD에서 발생하는 6펄스의 주파수를 기준으로 하여 속도가 변화함에 따라 6펄스의 주파수에 비례하면서 증가된 PLL의 출력파형을 얻었다.

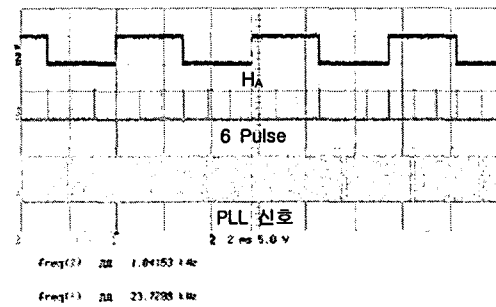


그림 17 6펄스 신호와 PLL신호(10000rpm)
Fig. 17 6Pulse Signals and PLL Singals(10000rpm).

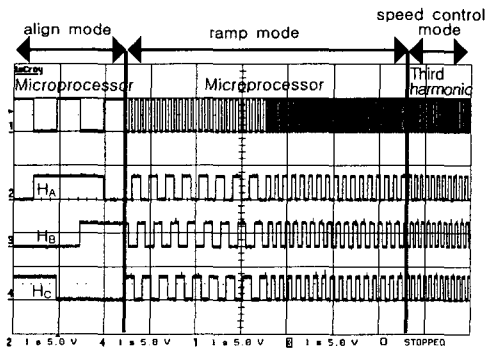


그림 18 초기구동 동작모드
Fig. 18 Start up operation mode.

그림 18은 PM BLDC 전동기의 초기구동신호를 나타내고 있다. 초기구동은 3개의 동작모드로 구성되어 있다.

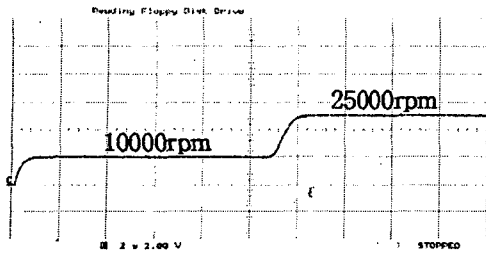


그림 19 측정된 속도 파형(10000, 25000rpm)
Fig. 19 Calculated speed wave (10000, 25000rpm).

그림 19는 10000rpm과 25000rpm으로 추정하는 속도파형을 나타낸다.

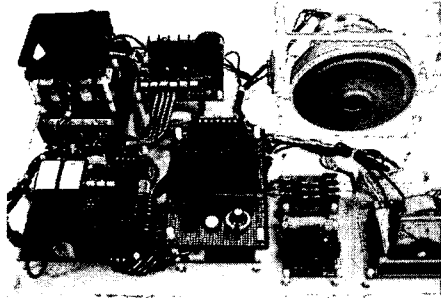


그림 20 실험 세트
Fig. 20 Experimental test setup.

그림 20은 제 3 고조파 신호를 이용한 PM BLDC 전동기 센서리스 구동 시스템의 전체 실험 세트를 나타내고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 PM BLDC 전동기의 센서리스구동 시스템을 개발함에 있어 홀센서 신호를 이용하지 않고 제 3 고조파 신호를 이용하여 회전자 위치를 판별함과 동시에 속도제어가 가능한 구동 시스템을 개발하였다. 또한 저가의 PLL회로를 적용함으로써 실제 산업계에서도 정밀한 속도 제어를 요하는 곳의 경우 기존에 PM BLDC 전동기 내부에 있는 위치센서나 엔코더 대신에 속도 센서 역할을 대신할 수 있다.

참고문헌 1과 비교했을 때 3고조파 신호를 이용하여 하드웨어로 구성된 홀센서 신호를 만듦으로써 응용분야에서의 홀센서로 인한 환경적인 제한상의 문제를 해결하였고, PLL회로를 적용하여 속도 분해능을 높이는 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Pragasen Pillay, Ramu Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part II: The Brushless Dc Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Application, vol.25,1989, pp.274-279.

- (2) Moreira, J. C. "Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet AC motors operating over a wide speed range", IEEE Trans. Ind. Application, vol. 32, pp. 1394-1401, 1996.
 (3) Hung-Chi Chen, Chang-Ming Liaw, " Current-mode control for sensorless BDCM drive with intelligent commutation tuning", IEEE Trans. Ind. Application, vol. 17, pp. 747-756, 2002.
 (4) Volpe G, "A phase-locked loop control system for a synchronous motor", Automatic Control, IEEE Trans. Vol. 15, pp. 88-95, Feb. 1970.
 (5) Wakasa T., Hai-Jao Guo., Idhinkura O., "A simple position sensorless driving system of SRM based on new digital PLL technique", Industrial Electronics Society, IECON, 28th Annual Conference of the IEEE, vol. 1, pp. 502-507, 2002.